第 38 卷第 2 期 生 态 学 报 Vol.38,No.2
2018 年 1 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Jan.,2018

DOI:10.5846/stxb201610102040
彭旭东,戴全厚,李昌兰.模拟降雨下喀斯特坡耕地土壤养分输出机制.生态学报,2018,38(2):624-634.
Peng X D, Dai Q H, Li C L.Output mechanism of soil nutrients from karst slope farmland under simulated rainfall.Acta Ecologica Sinica,2018,38(2):624-634.

模拟降雨下喀斯特坡耕地土壤养分输出机制

彭旭东,戴全厚*,李昌兰
贵州大学林学院,贵阳 550025

摘要:喀斯特区坡耕地水土及养分流失不仅是该区土地质量退化、土地生产力衰退主要原因,同时也是该区地下水质污染的重要因素。为揭示喀斯特坡耕地地表和地下二元空间结构下的土壤养分流失机制,以喀斯特坡耕地为研究对象,通过模拟其地表微地貌及地下孔(裂)隙构造特征,采用人工模拟降雨试验研究不同雨强下喀斯特坡耕地地表及地下水土及其氮、磷、钾流失特征。结果表明:(1)小雨强(50mm/h)和中雨强下(70mm/h),喀斯特坡耕地坡面产流主要以地下产流为主;大雨强下(90mm/h),地表径流高于地下径流;产沙方式则表现为由小雨的地表和地下产沙并重到中大雨强的地表产沙为主的一个转变过程。(2)在降雨侵蚀过程中,径流各养分输出浓度均表现出一定的初期冲刷效应,受土壤吸附作用影响,雨强对全钾(TK)和全氮(TN)的影响较全磷(TP)明显。(3)地表径流、地表泥沙和总泥沙各养分输出负荷均随雨强增大而增加,坡面径流泥沙总的 TK 输出负荷以泥沙为主,而 TN 和 TP 输出负荷则以径流为主;TP 和 TN 在径流的输出负荷上以地下径流输出为主(其中 TP 地表负荷比在 11.6%—46.2%,TN 在 7.0%—48.5%之间),而 TK 则以二者并重(地表负荷比在 43.5%—57.0%之间);各养分在泥沙的输出负荷上则均以地表泥沙流失为主,其负荷比均在 54.5%以上。研究结果可为喀斯特区坡耕地水土流失及养分流失的源头控制提供基本参数和科学依据。

关键词:输出机制;养分流失;水土流失;雨强;喀斯特坡耕地

Output mechanism of soil nutrients from karst slope farmland under simulated rainfall

PENG Xudong, DAI Quanhou*, LI Changlan
College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China

Abstract: Soil water and nutrient loss are not only the main reasons for degradation of land quality and declines in productivity, but also important factors contributing to the pollution of underground water in karst regions. Compared with non-karst areas, the special structure of karst slopes requires a different theory regarding soil nutrient loss. Previous studies have determined that rainfall is the primary external factor resulting in soil water and nutrient loss on slopes. Hence, determination of the mechanism of soil erosion and nutrient loss will allow for the elucidation of output characteristics of soil nutrients from karst slope farmlands under different rainfall intensities. In addition, understanding the direction and vehicle of nutrient loss could clarify the method of soil nutrient transfer on karst slopes. However, it is difficult to directly observe underground runoff and sediment on karst slopes (i.e., there is no feasible research method). Using karst slope farmlands as an example, the surface micro-topography and structural characteristics of underground pores and fissures were simulated in a laboratory based on field investigations on slope farmlands in the Guizhou Province karst areas. The goal of this study was to determine the characteristics of nitrogen, phosphorus, and potassium loss in runoff, as well as the sediment yield

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0502604);国家自然科学基金项目(41671275,41461057);贵州省重大专项(黔科合重大专项字[2016]3022 号);贵州省应用基础重大专项(黔科合 JZ 字[2014] 2002)
收稿日期:2016-10-10; **网络出版日期**:2017-09-14

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: qhdairiver@163.com

from surface and underground in karst slope farmlands under different rainfall intensities using simulated rainfall experiments. The results indicated that: 1) For light (50mm/h) and moderate rainfall intensity (70mm/h), runoff on karst slopes was primarily dominated by underground runoff; for heavy rainfall intensity (90mm/h), both surface and underground runoff were nearly equal, with the surface water runoff being slightly higher than that of underground runoff. Sediment yield changed from equivalent surface and underground sediment under the light rainfall intensity to surface sediment production being dominant at greater rainfall intensities. 2) The concentration of each nutrient in runoff exhibited an initial scouring effect during the process of rainfall erosion on karst slope farmlands. Influenced by the effect of soil absorption, the effect of rainfall intensity on total potassium (TK) and total nitrogen (TN) concentration in runoff was substantially greater than that of total phosphorus (TP). 3) The output load for each nutrient in surface runoff, surface sediment, and total sediment increased with increasing rainfall intensity. The output load of TK was dominated by sediment, but those of TN and TP were dominated by runoff on karst slope farmlands. With respect to runoff output, the output load of both TN and TP were dominated by underground runoff. The percentage of the TP load in the surface runoff relative to total runoff ranged from 11.6% to 46.2% and that of TN ranged from 7.0% to 48.5%; however, the output load of TK was equal between the surface and underground water, with the percentage of surface runoff relative to total runoff ranging from 43.5% to 57.0%. The sediment load for all nutrients was dominated by surface sediment, and the percentage of each nutrient in the surface sediment relative to total sediment was more than 54.5%. These results could provide basic parameters and a scientific basis to initiate control for soil water and nutrients loss on karst slope farmlands.

Key Words: output mechanism; nutrients loss; soil water loss; rainfall intensity; karst slope farmland

坡耕地是西南喀斯特地区重要的耕地资源,而其水土流失是江河湖泊泥沙的主要来源[1]。泥沙作为坡耕地土壤养分流失的主要载体[2-3],喀斯特地区严重水土流失致使大量土壤养分随径流及泥沙流入河流水库,造成地表水体富营养化及地下水环境的污染[4-5]。降雨是非点源污染发生的源动力,也是养分输出的溶剂和载体[6],降雨产生的径流泥沙及其养分流失严重导致土壤肥力退化、生产力下降[7]。近年来,众多研究者针对土壤类型、降雨因子、地形因子、不同土地利用方式等因素,通过室内模拟降雨或野外长期定位监测,对坡地土壤侵蚀与养分流失基本特征进行了研究[8-9]。诸如李宪文等[10]研究表明土壤氮素流失以径流为主,主要形态为 NO_3-N,黄满湘等[11]通过对北京地区农田氮素养分随地表径流流失机理研究表明,氮素流失量随雨强增大而增大,王辉、林超文、马琨等[12-14]通过人工模拟降雨试验研究降雨过程中氮磷钾的流失情况,结果表明各养分流失与雨强均有一定的相关关系。目前,有关雨强对坡面土壤养分流失的研究已有不少报道[15-17],但具有独特地表-地下二元空间结构的喀斯特坡地土壤养分流失研究处于空白。与非喀斯特区相比,具有特殊结构的喀斯特坡面将形成不同于非喀斯特区坡面土壤养分流失理论。降雨作为坡面水土及其养分流失的直接外营力因子,深入揭示不同雨强下喀斯特坡耕地土壤养分流失的输出特征,有助于揭示其水土及养分流失机理,明确喀斯特坡耕地养分流失途径和载体,阐明土壤养分迁移规律。由于喀斯特坡面地下径流泥沙野外直接观测难度系数较大,且目前尚无切实可行的研究方法和手段,故本研究在对喀斯特坡耕地野外实地调查基础上,通过模拟其地表微地貌及地下孔(裂)隙双层空间构造特征,采用人工模拟降雨试验,研究极端降雨强度下喀斯特坡耕地地表和地下径流、泥沙携带养分的流失规律,以期为喀斯特坡耕地养分流失控制和农业面源污染防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验土壤采自贵州省贵阳市花溪区(106°39′18″E,26°19′17″N)碳酸盐岩发育的石灰性土坡耕地 0—30cm 耕层土壤,其土壤砂粒(0.05—1.00mm)含量 38.33%、粉粒(0.05—0.001mm)43.33%,黏粒(<0.001mm)

18.33%，全氮含量 9.72g/kg，全磷 2.04g/kg，全钾 8.72g/kg，速效磷 22.91mg/kg，速效钾 60.53mg/kg，水解氮为 124.60mg/kg。供试土壤不过筛，只对大的土壤团块进行分散处理(即将大于 10cm 土块沿自然脆弱带掰开)，风干，均匀混合备用。

试验设备包括自行设计的可调孔(裂)隙度的变坡钢槽[18]和 QYJY-501(502)便携式全自动下喷式人工降雨器(图 1)。变坡钢槽规格为：宽 1.5m×长 4.0m×深 0.35m，坡度在 0—45°任意可调，底板均匀打孔，孔径 5cm，孔(裂)隙度在 0—8%任意可调。钢槽下端分别设有地表、地下孔(裂)隙流集流槽，集流槽出水口下方采用塑料小桶收集径流泥沙样。在课题组前期研究[19-21]基础上，试验钢槽有所改进，即在其左右两边及下边在隔 10cm 层处均匀打孔(1cm 孔径)以排除不同土层深度的壤中流。

降雨器降雨高度 6m，雨滴终点速度满足天然降雨特性，雨强可遥控或手动调节，其变化范围为 10—200mm/h，调节变化时间低于 30s，调节精度为 7mm/h，降雨有效范围 6.5m×6.5m，均匀度高于 85%。在土槽两侧放置两个雨量筒以校验本次试验的实际雨强。

1.2 研究方法

1.2.1 坡面模拟

为模拟喀斯特自然坡面，地表微地貌采用裸露基岩和土壤进行模拟，首先是选择直径≥35cm 的石灰岩碳酸盐块石测量并标记出 30cm 以上部分露头面积，随机排列在试验钢槽中(图 1)，使块石标记处 5cm 以上部分的岩石裸露率达到设计水平，然后装填土壤。试验填土厚度为 30cm，按分层厚度 10cm 分为 3 层，自下而上按野外实测土壤紧实度分层装填土壤，其土壤紧实度平均值依次为 1070、760、410kPa(土壤容重依次为 1.4、1.2g/cm^{3}和 1.0g/cm^3)，使填土表面与石灰岩块石 30cm 标记处水平齐平；填土表面用特制木板耙平，边界处人为用手压实以减小边界效应影响。地下孔(裂)隙则采用钢槽底板的排水孔进行模拟，孔径 5cm，其孔(裂)隙度则通过调节两块底板圆孔错位进行模拟。最后降小雨使土壤沉降，并调节地下孔(裂)隙度至试验设计水平。

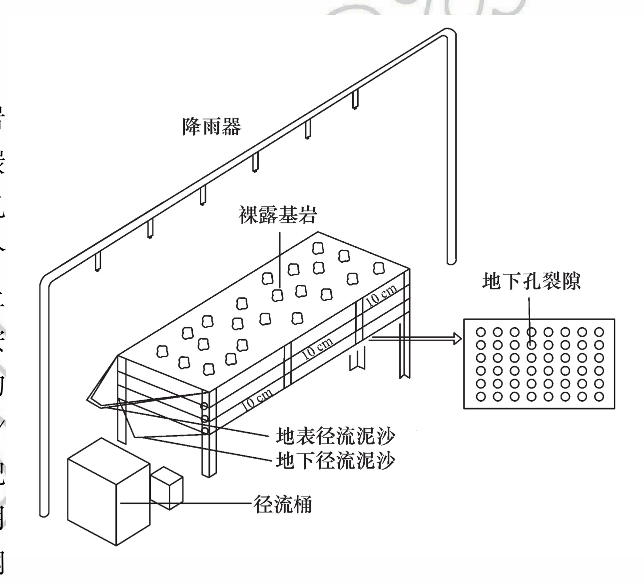


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Sketch of the experimental equipment

1.2.2 试验设计

基于贵州省喀斯特坡耕地野外实地调查和文献资料分析，基岩裸露率设计为贵州省广泛分布的无石漠化农作坡耕地(基岩裸露率 10%)，坡度设计为 25°(该坡度为调查区域喀斯特坡耕地常见坡度，且 25°作为退耕还林临界坡度)。地下孔(裂)隙度为地下孔(裂)隙水平投影面积占钢槽底板总面积的百分比[19]，设计水平为 5%。降雨强度基于贵州省暴雨资料，设计的极端雨强为小雨强 50mm/h，中雨强 70mm/h 和大雨强 90mm/h 3 个水平；降雨历时 90min，每个雨强重复 2 次试验。

1.2.3 模拟降雨

降雨试验在贵州大学林学院降雨大厅进行。试验开始前，调节坡度和雨强至设计水平，并先降小雨沉降至土壤水分饱和。然后，调节设计雨强大小并开始降雨，地表或地下开始产流便开始计时，每隔 10min 接取 1 次地表和地下径流泥沙样，分别装在标有刻度的大桶内，以测定坡面产流量和产沙量。水样采集后现场加酸并置于 4℃冰箱保存，并在 24h 内进行室内测定。

1.2.4 样品测试

径流中的全磷(TP)采用过硫酸钾氧化钼锑抗分光光度法测定，全钾(TK)采用原子吸收光谱仪法测定，全氮(TN)采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法测定[22]，采集人工模拟降雨试验用水作为空白样，径流分析结

果扣除该空白。泥沙中的 TN 采用半微量凯氏法测定,TP 采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法,TK 用酸溶-火焰光度法;碱解氮采用碱解扩散法,速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法。

2　结果与分析

2.1　不同雨强下径流泥沙输出过程和分配特征

喀斯特坡耕地坡面产流主要包括地表径流和地下径流两种形式,其产流形式也决定了坡面土壤养分流失方式,因此分析坡耕地径流泥沙输出过程可为揭示其土壤养分流失机制奠定基础。图 2 为不同雨强下喀斯特坡耕地地表和地下径流产流过程,可以看出,不同雨强下的径流输出过程差异较大。在小雨强(50mm/h)下,坡面产流主要以地下产流为主,主要是因为在小雨强条件下,雨滴对表层土壤的击溅能力较弱,大量雨水将下渗并沿裂隙形成地下径流。在中雨强(70mm/h)条件下,坡面产流仍以地下径流为主,但地下径流量明显高于地表径流,且二者均高于小雨强;此外,地表、地下径流随降雨历时变化趋势相同,均表现为在降雨前 20min 时,径流量迅速增多,20min 后则随降雨历时延长其径流量总体趋于稳定。与小雨强和中雨强不同,在大雨强(90mm/h)下,坡面产流则呈地表和地下径流并重,地表径流量总体上大于地下径流量,地表、地下径流量均在产流历时 40min 达到最大值。综合以上分析,喀斯特坡耕地产流过程受雨强影响很大,中小雨强下产流方式以地下径流为主,且地下径流量与地表径流量之间的差异随雨强增大而越明显;大雨强下产流出现转变,其以地表和地下径流并重且地表径流略高于地下径流。

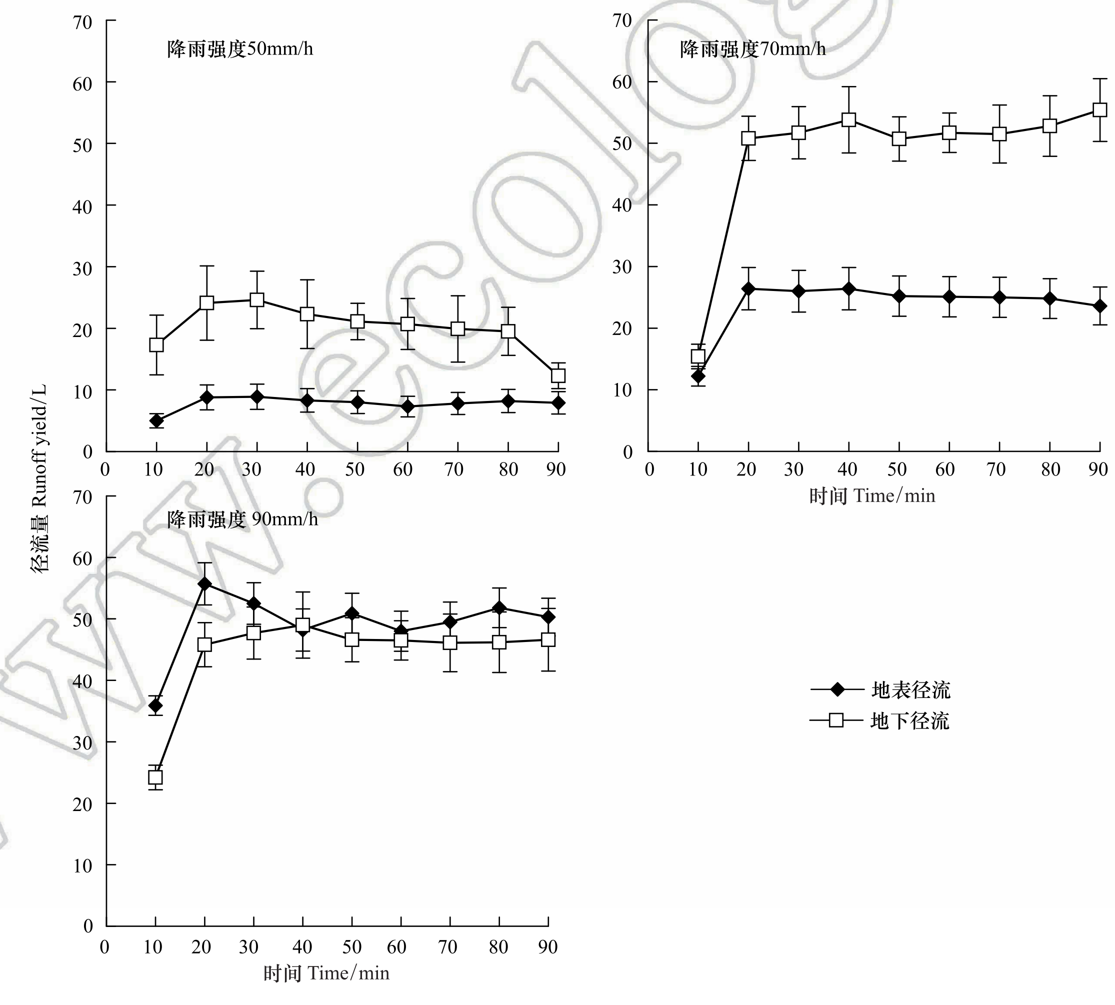


图 2　不同雨强下地表径流和地下径流产流过程

Fig.2　Runoff yield process of surface and underground under different rainfall intensities

图 3 为不同雨强下地表径流和地下径流产沙过程。可以看出,喀斯特坡耕地坡面产沙过程明显不同于其产流过程。在小雨强条件下,产沙方式是地表泥沙量和地下泥沙量并重,即土壤侵蚀为地表侵蚀和地下漏失并重;同时,地表径流产沙量随时间变化起伏较大,总体上在降雨历时 10—20min 时迅速上升达到最大值,之后随着降雨历时的延长呈减小趋势,主要是因为在降雨初期,表层土壤较松散,所含土壤细颗粒含量较高,因此随地表径流流失的泥沙含量就多,随着时间的延长,坡面土壤中细颗粒含量逐渐减少,加上雨滴对土壤颗粒的击溅能力一定,因此随径流流失的泥沙含量相应减少;地下径流产沙量总体上随降雨历时的增加呈先增大后减小的变化趋势,产沙量在降雨时间为 50min 时达到峰值,可能是由于雨水的下渗过程需要一定的运移时间,而雨水在土壤中的运移过程是一个复杂的物理过程,因此泥沙出现峰值的时间相对滞后。中雨强和大雨强条件下,坡面产沙方式主要以地表产沙为主,表明喀斯特坡耕地土壤侵蚀方式是一个随雨强变化而变化的过程,大雨强(大暴雨)下主要以地表侵蚀的形式发生。

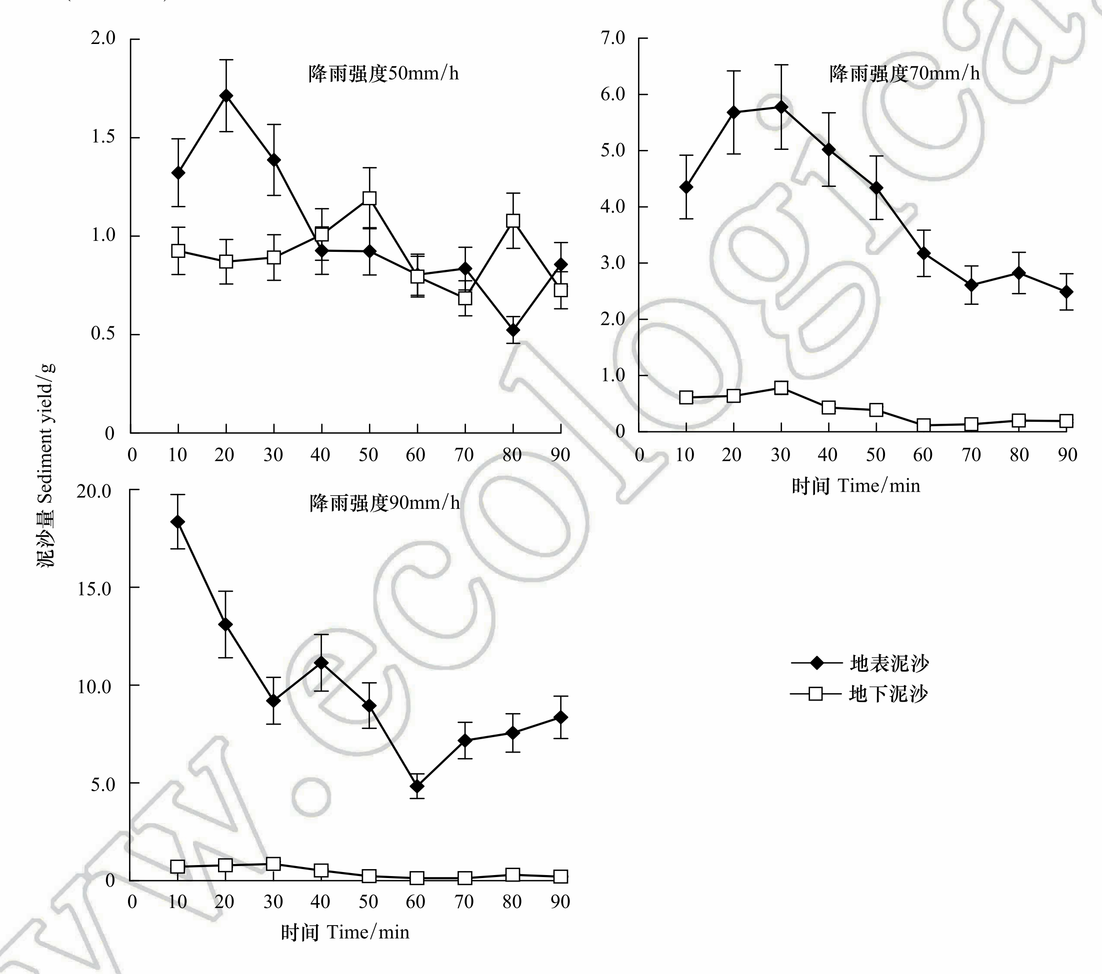


图 3 不同雨强下地表径流和地下径流产沙过程

Fig.3 Sediment yield process of surface and underground under different rainfall intensities

表 1 为不同雨强下地表径流和地下径流产流特征。可以看出,地表径流总量随雨强增大而增大且在不同雨强间差异显著($P<0.05$),大雨强条件下的地表径流量可为小雨强的 6.3 倍,地表平均流量和泥沙含量均随雨强而呈相同的变化规律,说明雨强是土壤侵蚀产生的重要影响因子;而地下径流各指标随雨强变化关系不明显。总体而言,在小雨强和中雨强条件下,坡面产流主要以地下径流为主,小雨强下的地下径流系数达到 0.50,而地表径流系数仅为 0.43,本实验中泥沙流失主要以地表侵蚀为主,地下漏失所占比例较小。

2.2 不同雨强下径流泥沙养分输出过程

图 4 为不同雨强下喀斯特坡耕地径流全钾(TK)浓度的变化过程曲线。可以看出,在小雨强和中雨强条

件下,地表、地下径流 TK 浓度在降雨初期达到最大值,随着降雨历时延长,径流中 TK 浓度逐渐降低,最后趋于稳定,表现出明显的初期冲刷效应。就小雨强而言,地表和地下径流 TK 浓度随降雨历时呈降低趋势,且地表径流 TK 浓度明显高于地下径流,这主要受钾素特性的影响,即以入渗形式向地下迁移的钾离子少;大雨强条件下,地表、地下径流 TK 浓度随降雨历时呈先增大后减小的变化趋势,径流 TK 浓度在 50min 时达到最大值 0.25mg/L 左右,主要是因为在大雨强条件下,降雨初期径流形成迅速,钾素来不及溶解于径流中。综合以上分析,各雨强下地表径流 TK 输出浓度高于地下径流,且在小雨强下二者相差最大,随雨强增大这种差异减小。

表 1　不同雨强下地表径流和地下径流产流特征

Table 1　Characteristics of surface and underground runoff under different rainfall intensities

雨强 Rainfall intensity	地表径流 Surface runoff				地下径流 Underground runoff			
	产流总量 Runoff volume/L	径流系数 Runoff coefficient/%	平均流量 Average runoff/(L/min)	泥沙量 Sediment yield	产流总量 Runoff volume/L	径流系数 Runoff coefficient/%	平均流量 Average runoff/(L/min)	泥沙量 Sediment yield
小雨 Light rainfall	70.2±20.34c	0.43±0.05b	7.80±1.25c	9.29±2.11c	181.8±23.6c	0.50±0.11b	20.20±4.24c	8.17±1.96a
中雨 Moderate rainfall	214.7±33.16b	0.27±0.10c	23.85±4.88b	36.26±5.26b	433.8±52.1a	0.67±0.20a	48.20±5.85a	3.48±0.74b
大雨 Heavy rainfall	442.8±52.85a	0.52±0.27a	49.20±6.29a	88.64±11.21a	398.7±46.8b	0.44±0.15c	44.30±6.26ab	3.84±1.11b

用 LSD 法进行多重比较;同列标有不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05),相同字母表示组间差异不显著(P>0.05)

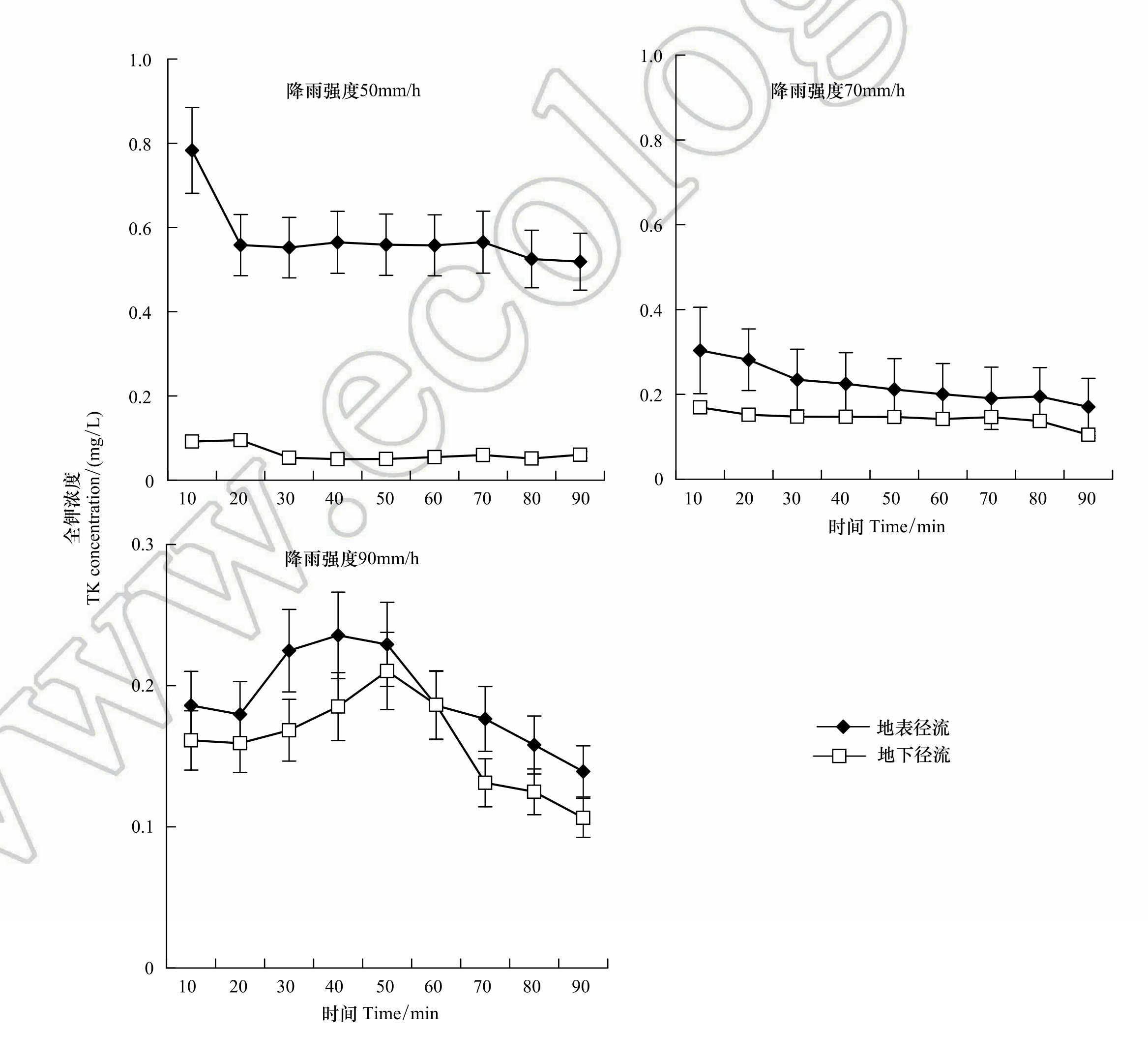


图 4　不同雨强下地表径流和地下径流 TK 浓度变化过程

Fig.4　TK concentrations in runoff of surface and underground under different rainfall intensities

图 5 为不同雨强下地表和地下径流全磷(TP)浓度输出过程。可以看出,无论是小雨强、中雨强还是大雨强条件下,地表、地下径流 TP 浓度均随降雨历时延长呈降低变化,但数值总体较小,这主要是磷元素在土壤中易被吸附固定,不易随地表或地下径流流失。小雨强时,地表径流 TP 浓度高于地下径流,而中雨强和大雨强时则相反。小雨强条件下 TP 输出浓度明显高于中雨强和大雨强下的输出浓度,主要是因为小雨强条件下产生的径流量比中雨强和大雨强的径流量少,TP 浓度的高低由土壤中 TP 流失量与产生的径流量同时决定,因此小雨强条件下的流失浓度较高。

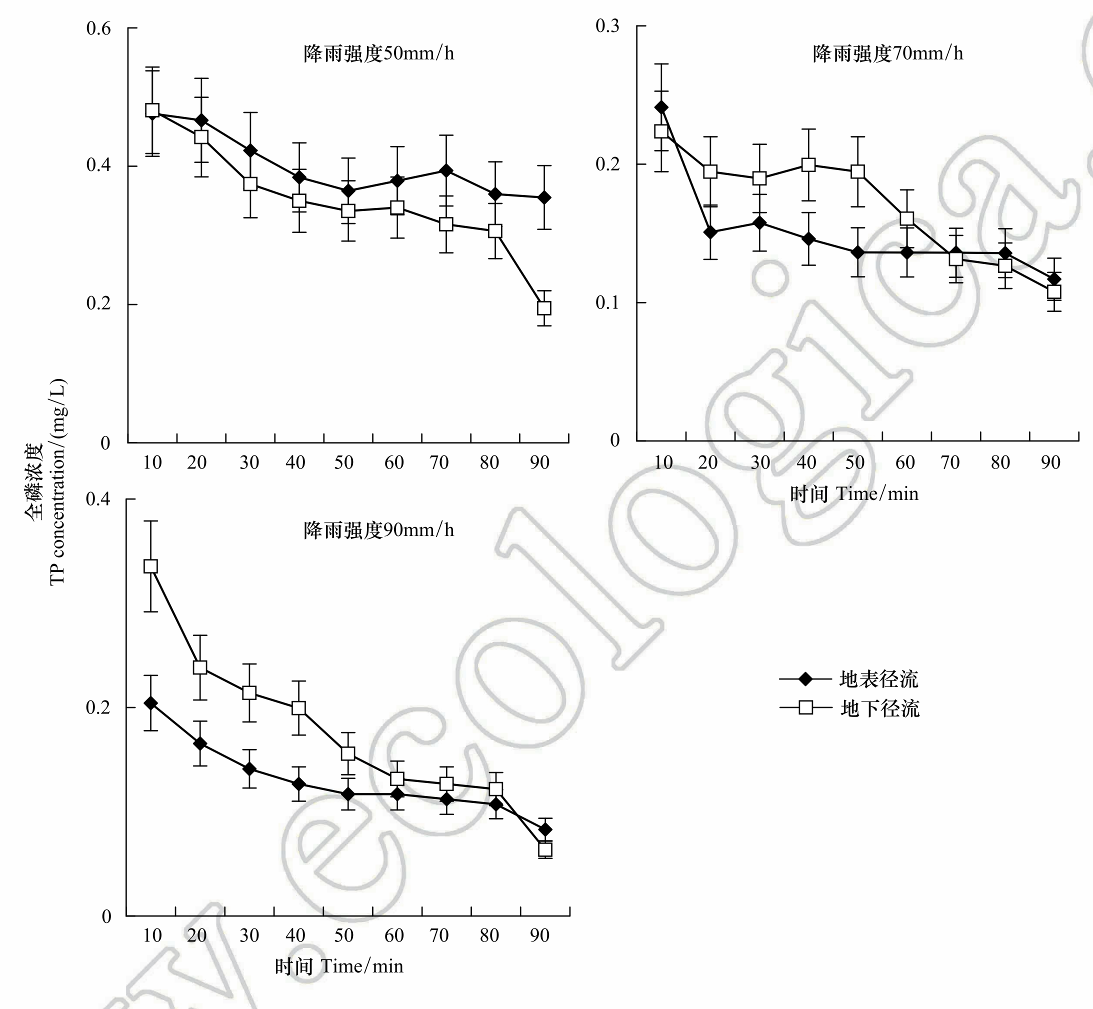


图 5 不同雨强下地表径流和地下径流 TP 浓度变化过程

Fig.5 TP concentrations in runoff of surface and underground under different rainfall intensities

图 6 为不同雨强下地表和地下径流全氮(TN)浓度变化过程。就各雨强而言,喀斯特坡耕地地表、地下径流 TN 流失浓度在产流初期浓度最高且随产流时间延长呈降低趋势,表现出明显的初期冲刷效应。无论在小雨强、中雨强还是大雨强条件下,喀斯特坡耕地地表和地下径流氮素输出浓度均远大于 TK 和 TP 流失浓度,在小雨强条件下,地下径流浓度在降雨初期可高达 6mg/L,对其他雨强而言 TN 流失浓度始终高于 1mg/L,说明喀斯特坡耕地氮素流失较钾速和磷素流失严重。

比较表 2 可知,泥沙养分浓度远大于径流养分浓度。在小雨强和中雨强条件下,地表、地下流失泥沙养分平均浓度相差不大,说明在雨强较小的情况下,通过泥沙流失的养分以主要决定于其产沙量的大小;不同雨强下的地表泥沙养分流失浓度主要表现为 TK 和碱解氮随雨强增大浓度逐渐降低,TN 和速效钾随雨强增大呈先增加后减小的变化,TP 呈增加的变化,而速效磷则呈先减小后增加变化,主要原因可能与养分在土壤中的溶解有关。

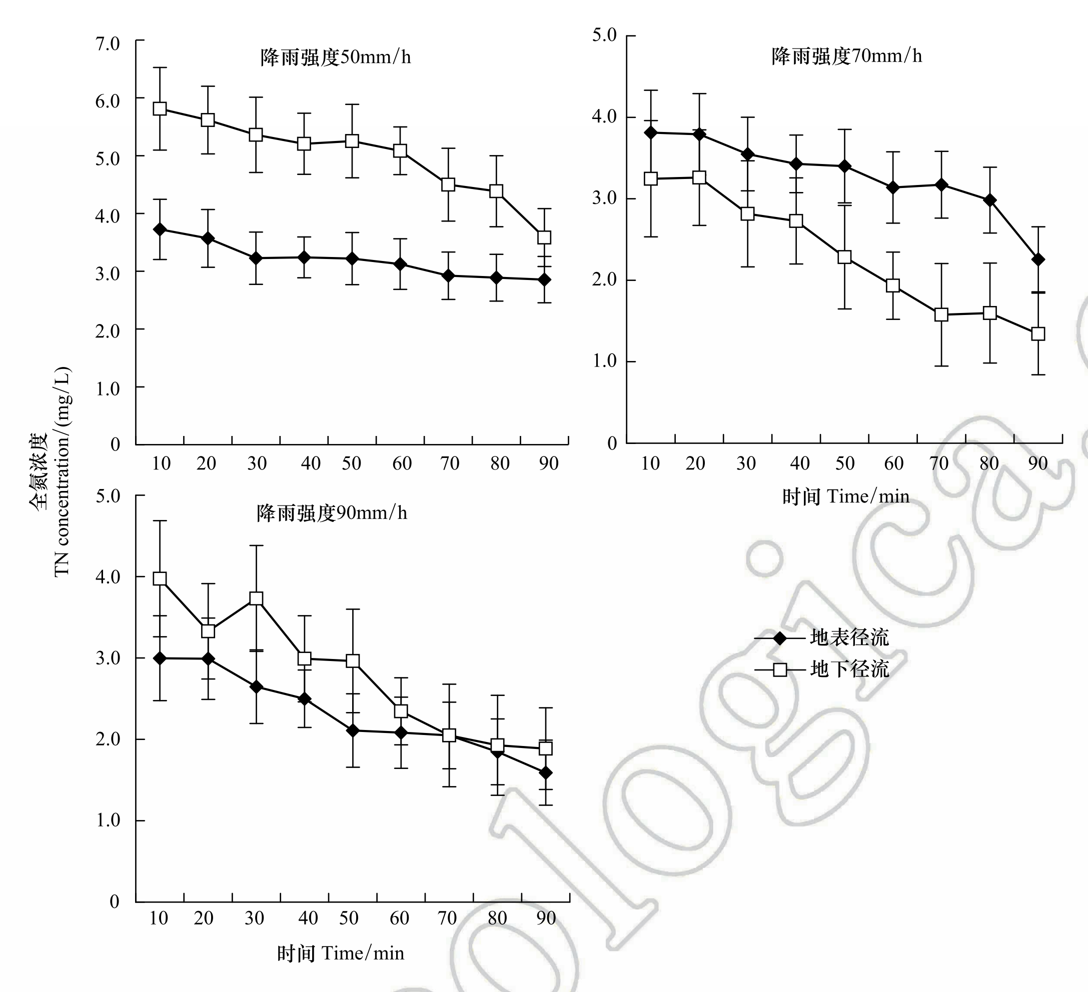


图 6　不同雨强下地表径流和地下径流 TN 浓度变化过程

Fig.6　TN concentrations in runoff of surface and underground under different rainfall intensities

表 2　不同雨强下泥沙养分平均浓度

Table 2　Average concentration of sediment nutrients under different rainfall intensities

类型 Types	雨强 Rainfall intensity	全钾 Total potassium/(g/kg)	速效钾 Available potassium/(mg/kg)	全磷 Total phosphorus/(g/kg)	速效磷 Available phosphorus/(mg/kg)	全氮 Total nitrogen/(g/kg)	碱解氮 Available nitrogen/(mg/kg)
地表泥沙	小雨	8.98±1.39a	145.71±20.51b	0.56±0.10c	14.51±2.54b	12.60±3.81ab	207.62±19.86a
Surface sediment	中雨	7.24±1.46b	161.14±9.02a	0.71±0.11ab	11.20±1.12c	12.92±2.18a	173.51±24.47b
	大雨	6.56±0.58c	123.82±11.36c	0.76±0.12a	17.31±2.30a	12.71±2.04ab	155.51±13.65bc
地下泥沙	小雨	6.83±0.98c	165.60±17.78b	0.43±0.09c	12.73±2.94b	10.86±2.32a	173.60±16.74ab
Underground sediment	中雨	7.79±1.32a	175.13±20.43b	0.77±0.10a	14.51±1.51b	8.99±1.41ab	178.53±18.88a
	大雨	7.28±0.39ab	545.20±66.65a	0.76±0.13ab	22.91±4.61a	7.59±1.11b	158.00±20.12b

地下流失泥沙养分平均浓度 TK、TP、TN 和碱解氮随雨强变化关系不明显,这与各元素自身特性及地表和地下径流泥沙分配有关;速效钾和速效磷输出浓度则随雨强增大而增大,雨强为 70mm/h 和 90mm/h 条件下的速效钾输出浓度较 50mm/h 分别增加了 5.75%和 229.23%,而碱解氮输出浓度在中雨强时达到最大值(178.53mg/kg),这进一步说明喀斯特地区坡耕地地表、地下流失同时存在的情况下,养分流失不仅受单一因子的影响,各养分流失过程还受地表和地下径流泥沙分配的影响,这与非喀斯特区明显不同。

2.3　不同雨强下径流泥沙养分负荷输出特征

降雨条件下坡耕地土壤溶质迁移主要包括两个过程,一是在降雨过程中,土壤溶质随下渗水分向土壤深

层迁移,即土壤养分淋失;二是当雨强大于土壤下渗能力时土壤中的溶质在雨滴击溅及雨水冲刷作用下,随地表径流迁移,即土壤养分横向流失。分析不同雨强下喀斯特坡耕地径流养分流失量变化(表 3)可知,地表径流各养分流失量均随雨强增大而增加,且总体在小雨强、中雨强与大雨强间存在显著差异,而地下径流各养分流失量则随雨强变化不明显(除 TK 外),说明雨强对喀斯特坡耕地地表径流养分输出影响明显,而对地下径流养分输出及总输出影响不明显。地表径流对 TP 和 TN 的输出负荷比随雨强的增大而增加且均小于 50%,说明这两种养分在径流的输出上以地下径流输出为主,地表径流输出为辅,其中 TP 地表径流负荷比随雨强增大依次为 1.6%,31.6%和 46.2%,TN 依次为 7%, 41%和 48.5%。然而, TK 的地表径流输出负荷比随雨强变化关系不明显,其在各雨强下的流失以地表、地下径流并重,地表、地下负荷比均在 50%左右。

表 3 不同雨强下径流养分流失量

Table 3 Nutrients loss in runoff under different rainfall intensities

养分 Nutrients	雨强 Rainfall intensity	地表径流 Surface runoff / ($mg\ h^{-1}\ m^{-2}$)	地下径流 Underground runoff/ ($mg\ h^{-1}\ m^{-2}$)	总负荷 Total loads/ ($mg\ h^{-1}\ m^{-2}$)	地表径流负荷比 Ratio of surface runoff load/%
全钾	小雨	4.7±0.8b	3.5±0.7c	8.2±1.4c	57.0
Total potassium	中雨	5.4±0.6b	7.0±0.9ab	12.3±1.1b	43.5
	大雨	9.4±1.1a	7.3±1.0a	16.6±2.8a	56.3
全磷	小雨	3.1±0.7b	23.9±1.3a	27.1±3.4a	11.6
Total phosphorus	中雨	3.7±0.7b	8.0±1.1b	11.7±1.2c	31.6
	大雨	6.3±0.9a	7.4±0.7b	13.7±0.9b	46.2
全氮	小雨	24.9±2.5c	330.4±29.6a	355.2±45.5a	7.0
Total nitrogen	中雨	78.0±1.1b	112.2±10.5bc	190.3±21.3c	41.0
	大雨	113.8±12.6a	120.9±13.9b	234.7±33.3b	48.5

土壤中氮、磷、钾养分流失包括径流流失和泥沙携带两个部分,泥沙携带养分流失在坡耕地养分流失中占有较大的比重。分析不同雨强下各养分随泥沙流失(表 4)可知, 随雨强的增大,地表泥沙和总泥沙各养分的输出负荷增大;其中中雨强和大雨强条件下的 TK 泥沙总负荷分别是小雨强(11.8g $h^{-1}\ m^{-2}$)输出负荷的 2.6 倍和 6 倍左右;TP 在小雨强、中雨强和大雨强下的输出负荷分别为 0.9g $h^{-1}\ m^{-2}$,5.3g $h^{-1}\ m^{-2}$和 11.8g $h^{-1}\ m^{-2}$;

表 4 不同雨强下泥沙养分流失量

Table 4 Nutrients loss in sediment under different rainfall intensities

养分 Nutrients	小雨 Light rainfall				中雨 Moderate rainfall				大雨 Heavy rainfall			
	地表泥沙 Surface sediment	地下泥沙 Underground sediment	总负荷 Total load	地表泥沙负荷比 Ratio of surface sediment	地表泥沙 Surface sediment	地下泥沙 Underground sediment	总负荷 Total load	地表泥沙负荷比 Ratio of surface sediment	地表泥沙 Surface sediment	地下泥沙 Underground sediment	总负荷 Total load	地表泥沙负荷比 Ratio of surface sediment
TK/($g\ h^{-1}\ m^{-2}$)	8.8±1.2	3.0±0.4	11.8±1.7	74.4	27.6±4.5	6.4±0.9	33.9±2.3	81.3	64.6±10.2	5.9±0.8	70.6±10.2	91.6
TP/($g\ h^{-1}\ m^{-2}$)	0.7±0.2	0.2±0.1	0.9±0.1	81.8	4.9±0.8	0.4±0.1	5.3±0.6	92.3	11.0±1.0	0.8±0.1	11.8±1.3	92.9
TN/($g\ h^{-1}\ m^{-2}$)	12.3±2.1	10.1±2.3	22.4±2.5	54.9	49.2±11.2	3.5±0.7	52.7±14.7	93.4	80.7±2.5	6.2±1.1	86.9±6.6	92.9
速效钾 Available K/ ($mg\ h^{-1}\ m^{-2}$)	157.3±20.8	62.5±11.5	219.8±32.6	71.6	471.3±58.9	67.7±11.2	539.0±49.9	87.4	657.1±49.7	134.7±11.3	791.8±79.5	83.0
速效磷 Available P/ ($mg\ h^{-1}\ m^{-2}$)	14.2±1.9	11.8±1.4	26.0±4.0	54.5	42.6±5.2	5.6±0.9	48.2±11.2	88.4	59.3±3.6	18.6±0.9	78.0±10.1	76.1
碱解氮 Available N/ ($mg\ h^{-1}\ m^{-2}$)	91.6±11.1	50.3±10.8	141.9±7.5	64.6	660.5±87.7	69.0±1.9	729.5±63.3	90.5	753.4±49.2	128.5±10.0	881.9±75.3	85.4

TN 输出负荷在大雨强下的($86.9g\ h^{-1}\ m^{-2}$)可为小雨强下($22.4g\ h^{-1}\ m^{-2}$)的 3.9 倍,这说明雨强越大则土壤养分越容易随泥沙携带流失,主要因为雨强大则冲刷带走的泥沙越多。然而,地下泥沙各养分输出负荷随雨强变化关系不明显(除 TP,速效钾和速效氮外),说明喀斯特坡耕地土壤养分地下流失是一个复杂的过程,这可能与孔(裂)隙的构造、充填物及地表状况的因素有关,这还需进一步深入研究。此外,无论在小雨强、中雨强或大雨强下,各养分随泥沙流失均以地表泥沙流失为主,其负荷比均在 54.5%以上,不同雨强下的地表泥沙 TK 和 TP 负荷比表现为大雨强>中雨强>小雨强。当雨强较小时雨滴对表层土壤的冲刷能力弱,径流带走泥沙较少,故雨强越小则养分随地表泥沙流失量越少,反之,当雨强较大时,雨滴对土壤的冲刷能力较强,土壤细颗粒几乎随地表径流流走,从而表现出大雨强下的地表泥沙带走养分比例高于小雨强。综合表 3 和表 4 可看出,不同雨强下径流和泥沙总的 TK 输出负荷以泥沙为主,其泥沙负荷比在 59.0%以上,而 TN 和 TP 输出负荷则以径流为主,其径流负荷比在 53.7%以上。

3　讨论

雨强对喀斯特坡耕地养分流失有重要影响。降雨和径流是土壤养分流失的驱动力,也是养分输出的载体和溶剂[23]。降雨强度作为影响土壤养分随径流迁移的重要因素之一,其不仅为整个土-水体系统输入能量,而且也输入水量,因此分析雨强对喀斯特坡耕地水土流失及其养分流失的影响,是深入揭示土壤养分流失机理的关键。本研究中,中小雨强(50mm/h 和 70mm/h)下喀斯特坡耕地产流方式以地下径流为主,而大雨强下产流出现转变,其以地表和地下径流并重且地表径流略高于地下径流;产沙方式是一个随雨强变化而变化的过程,由小雨的地表和地下产沙并重到中大雨强的地表产沙为主的一个转变过程,这与前期未改进土槽的实验结果[21]有一定差异,即喀斯特坡耕地土壤侵蚀方式是一个从地下漏失到地表迁移的转变过程,且坡面产流方式以地下径流为主,而产沙方式以地表产沙为主。总体而言,地表和地下泥沙流失量随着雨强的增大而增加,这与聂小东等[24]的研究结果一致。

相关研究表明,降雨过程中径流养分浓度呈波动变化,不同雨强下地表径流中养分均存在明显的初期径流冲刷效应[25],而本研究中土壤养分浓度在产流初期也存在峰值,即亦存在初期冲刷效应。本文研究中,径流和泥沙 TN 流失量远远高于 TP 和 TK 流失量,且 TN 的径流流失量高于其泥沙流失量,说明 TN 流失以径流为主,已有研究也表明,土壤 N 流失以径流为主[10]。坡面养分流失主要以泥沙为载体,大多数学者甚至认为可以将泥沙携带的养分流失直接当作坡面的养分流失。本试验也证实了这一点,即泥沙中养分浓度远大于径流中的养分浓度[2-3]。本研究中径流和泥沙总的 TP 和 TN 流失量在小雨强时达到最大值,这与已有的研究存在差异[11,26],主要是因为已有研究多考虑地表径流而忽略了径流中存在的地下径流对养分流失的影响,喀斯特地区特殊的水文二元结构导致该区水土流失不仅存在于地表,地下漏失对坡地养分流失影响较大。

在具地表和地下二元三维空间结构的喀斯特区,非喀斯特区坡耕地土壤养分流失研究[27-29]已有的相关成果在应用上将受到限制;同时,受野外直接观测难度的限制,喀斯特坡耕地土壤养分流失的研究仍缺乏,特别是地下流失部分,即孔(裂)隙漏失的土壤养分研究。本研究在设计时综合考虑了坡度、降雨、岩石裸露率、孔裂隙度等多因子,通过室内模拟喀斯特坡耕地坡面土壤养分输出机制,与野外实际情况相比存在一定差异,具体表现在:野外孔(裂)隙构造复杂,且一般为土填充,少有完全空的孔(裂)隙。本文着重研究和揭示雨强的影响作用和机制,后续将综合考虑其他因子,并采用示踪技术研究水土及其养分在孔(裂)隙中的输移过程和机制,并开展野外定位观测的校验,逐步形成喀斯特坡耕地土壤养分流失理论体系。

4　结论

喀斯特坡耕地产流方式在中小雨强(50mm/h 和 70mm/h)下以地下径流为主,而大雨强下则以地表和地下径流并重且地表径流高于地下;产沙方式也是一个随雨强变化而变化的过程,由小雨的地表和地下产沙并重到中大雨强的地表产沙为主的一个转变过程。在喀斯特坡耕地降雨侵蚀过程中,径流各养分浓度输出均表

现出一定的初期冲刷效应,受土壤吸附作用影响,雨强对 TK 和 TN 的影响较 TP 明显。不同雨强下喀斯特坡耕地径流泥沙总的 TK 输出负荷以泥沙为主,其泥沙负荷比高达 59.0%以上,而 TN 和 TP 输出负荷则以径流为主,其径流负荷比在 53.7%以上;其中 TP 和 TN 在径流的输出负荷上以地下径流输出为主,地表径流输出为辅,而 TK 则以二者并重;各养分在泥沙的输出负荷上则均以地表泥沙流失为主,其负荷比均在 54.5%以上。因此,未来在喀斯特坡耕地水土及养分流失控制过程中,既要减小地下径流的产生,也要控制地表泥沙的形成。

参考文献(References):

[1] 王海明, 李贤伟, 陈治谏, 廖晓勇. 三峡库区坡耕地粮经果复合垄作对土壤侵蚀与养分流失的影响. 水土保持学报, 2010, 24(3): 1-4, 17-17.

[2] 黄丽, 张光远, 丁树文, 蔡崇法, 蔡强国. 侵蚀紫色土土壤颗粒流失的研究. 水土保持学报, 1999, 5(1): 35-39, 85-85.

[3] 许峰, 蔡强国, 吴淑安. 坡地农林复合系统土壤养分过程研究进展. 水土保持学报, 2000, 14(1): 82-87.

[4] 李昌兰, 戴全厚, 彭旭东, 袁应飞. 喀斯特裸坡地地下孔(裂)隙流养分流失特征研究. 水土保持学报, 2016, 30(3): 19-23, 114-114.

[5] Girotto E, Ceretta C A, dos Santos D R, Brunetto G, de Andrade J G, Zalamena J. Forms of losses of copper and phosphorus in water of runoff and percolation in soil with successive pig slurry application. Ciência Rural, 2010, 40(9): 1948-1954.

[6] 吴希媛, 张丽萍, 张妙仙, 倪含斌, 王辉. 不同雨强下坡地氮流失特征. 生态学报, 2007, 27(11): 4576-4582.

[7] 陈玲, 宋林旭, 崔玉洁, 张彪, 朱晓明, 刘德富. 模拟降雨条件下黄棕壤坡耕地磷素流失规律研究. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 49-55.

[8] 谢小立, 王凯荣. 湘北红壤坡地雨水过程的水土流失及其影响. 山地学报, 2003, 21(4): 466-472.

[9] 傅涛, 倪九派, 魏朝富, 谢德体. 不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 71-74, 101-101.

[10] 李宪文, 史学正, Ritsema C. 四川紫色土区土壤养分径流和泥沙流失特征研究. 资源科学, 2002, 24(6): 22-28.

[11] 黄满湘, 章申, 张国梁, 张秀梅. 北京地区农田氮素养分随地表径流流失机理. 地理学报, 2003, 58(1): 147-154.

[12] 王辉, 王全九, 邵明安. 表层土壤容重对黄土坡面养分随径流迁移的影响. 水土保持学报, 2007, 21(3): 10-13, 18-18.

[13] 林超文, 庞良玉, 罗春燕, 陈一兵, 黄晶晶, 涂仕华, 张鸿. 平衡施肥及雨强对紫色土养分流失的影响. 生态学报, 2009, 29(10): 5552-5560.

[14] 马琨, 王兆骞, 陈欣, 尤力. 不同雨强条件下红壤坡地养分流失特征研究. 水土保持学报, 2002, 16(3): 16-19.

[15] Zuazo V H D, Martínez J R F, Tejero I G, Pleguezuelo C R R, Raya A M, Tavira S C. Runoff and sediment yield from a small watershed in southeastern Spain (Lanjarón): implications for water quality. Hydrological Sciences Journal, 2012, 57(8): 1610-1625.

[16] 傅涛, 倪九派, 魏朝富, 谢德体. 雨强对三峡库区黄色石灰土养分流失的影响. 水土保持学报, 2002, 16(2): 33-35, 83-83.

[17] 彭浩, 张兴昌, 邵明安. 雨强对黄土区土壤钾素径流流失的影响. 生态环境, 2004, 13(3): 369-372.

[18] 戴全厚, 喻理飞, 杨智, 王佩将. 一种用于研究坡面径流和地下孔裂隙流的模拟试验装置: 中国, CN201010545602.7. 2011-03-23.

[19] 彭旭东, 戴全厚, 杨智, 赵龙山. 喀斯特山地石漠化过程中地表地下侵蚀产沙特征. 土壤学报, 2016, 53(5): 1237-1248.

[20] Dai Q H, Peng X D, Yang Z, Zhao L S. Runoff and erosion processes on bare slopes in the Karst Rocky Desertification Area. Catena, 2017, 152: 218-226.

[21] 彭旭东, 戴全厚, 李昌兰, 袁应飞, 赵龙山. 模拟雨强和地下裂隙对喀斯特地区坡耕地养分流失的影响. 农业工程学报, 2017, 33(2): 131-140.

[22] 国家环境保护总局, 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243-257, 409-412.

[23] Ramos M C, Martínez-Casasnovas J A. Nutrient losses by runoff in vineyards of the Mediterranean Alt Penedès region (NE Spain). Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 113(1): 356-363.

[24] 聂小东, 李忠武, 王晓燕, 申卫平, 张雪, 郭旺, 马文明, 王曙光. 雨强对红壤坡耕地泥沙流失及有机碳富集的影响规律研究. 土壤学报, 2013, 50(5): 900-908.

[25] 陈玲, 刘德富, 宋林旭, 崔玉洁, 张革. 不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究. 环境科学, 2013, 34(6): 2151-2158.

[26] 张丽萍, 张锐波, 吴希媛. 不同管理方式竹林坡地降雨径流中氮磷流失特性模拟试验. 水土保持学报, 2011, 25(6): 1-6.

[27] 袁东海, 王兆骞, 陈欣, 郭新波, 张如良. 红壤小流域不同利用方式氮磷流失特征研究. 生态学报, 2003, 23(1): 188-198.

[28] 安娟, 郑粉莉, 李桂芳, 王彬. 不同近地表土壤水文条件下雨滴打击对黑土坡面养分流失的影响. 生态学报, 2011, 31(24): 7579-7590.

[29] 林超文, 罗春燕, 庞良玉, 黄晶晶, 付登伟, 涂仕华, 蒲波. 不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响. 生态学报, 2010, 30(22): 6091-6101.